

文章编号: 1000-8055(2005)04-0567-05

概率密度函数分析监测发动机 气动不稳定征兆

张 朴, 李应红, 吴 云, 刘建勋, 张百灵
(空军工程大学工程学院 推进系统实验室, 陕西 西安 710038)

摘要: 对某型单轴涡喷发动机节流过程中的喘振故障进行了试验研究。在手工关闭放气带的情况下, 该型发动机的共同工作线确定地穿越喘振区域, 从最大状态收油门减速将会导致该型发动机进入不稳定工作。数据分析中发现压气机第一级静子机匣壁面静压对节流最为敏感, 且静压脉动分量的概率密度函数分布随节流有规律地发生变化。定义了概率密度函数特征值 θ 来量化这种变化。进一步的数据分析表明, θ 可以反映压气机第一级端部的流动分离情况, 可以作为试验发动机节流过程中的气动稳定性指标。与直接检测模态扰动和短周期扰动相比, 监测 θ 的变化可以为该型发动机提供较长的失速预警时间。

关键词: 航空、航天推进系统; 气动不稳定; 概率密度函数; 实验; 压气机; 旋转失速; 喘振
中图分类号: V 231.3 **文献标识码:** A

Application of Probability Density Function Analysis in the Monitoring of Engine Aerodynamic Instability Precursor

ZHANG Pu, LI Ying-hong, WU Yun,
LIU Jian-xun, ZHANG Bai-ling

(Propulsion System Laboratory, Engineering Institute,
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Experiments were performed to investigate surge problem of a single shaft axial flow turbojet engine during throttling. If the discharge bleed valve of the engine is closed manually, the working line of the engine will traverse the stalling region in a mass flow range, thus throttling from full speed may surely transit the engine into unstable operation. It is observed that the casing wall static pressure of the first compressor stage stator is most sensitive to throttling operation, and that probability density functions of the pulsating components of the static pressure vary accordingly. An eigenvalue, θ , is then introduced to quantify the variation of probability density functions. Further data analysis demonstrates that eigenvalue θ is capable of reflecting some aspects of flow separation in the tip region of the first compressor stage, and that θ may serve as an indicator of imminent aerodynamic instability of the engine, thus long stall warning time of the examined turbojet engine is achievable than that to directly detect modes or spikes.

Key words: aerospace propulsion system; aerodynamic instability;

收稿日期: 2004-05-31; **修订日期:** 2004-09-06

作者简介: 张朴(1973-), 男, 四川汉源人, 空军工程大学工程学院博士生, 工程师, 主要从事航空发动机稳定性与监控诊断研究

probability density function; experimental investigation; compressor;
rotating stall; surge

航空发动机气动不稳定的早期检测对于其安全、可靠工作至关重要。模态扰动和短周期扰动被认为是导致轴流式压气机气动不稳定的两种主要的扰动形式。有许多方法,如行波能量法^[1]、自相关系数法^[2]、平均值数值差分方法^[3]、相关积分法和结构函数法^[4]等,被用以检测这两种失速前的扰动信号。此外,还有一些基于小波分析和非线性时间序列分析的检测方法^[5]。这些方法大多基于检测失速前的模态波和短周期扰动尖峰。由于压气机动力学的复杂性,很难有一种通用的算法可以同时检测这两种扰动信号。

大量研究表明,压气机转子端部流态在设计点和近失速点有很大差别,文献[6]在最近所做的研究也证实了这一点。因此,有可能通过检测压气机端部的流态来判明压气机的工作稳定性。

另外一个普遍的现象是,对于某一给定的内流或外流的测点,其测量压力的概率密度函数随流动分离程度有较大的变化^[7~10]。在某型涡喷发动机的气动不稳定实验中也观察到了同样的现象:在发动机节流过程中,压气机第一级静子机匣壁面静压的概率密度函数随节流程度有规律地发生变化。这实际是上游端部区域流动特性变化的反映。定义了一个零均概率密度函数(PDF, Probability Density Function)特征值来量化这种变化,这个值可以表征该发动机压气机第一级静子机匣壁面在设计点或近失速点的流态。

1 机匣壁面静压脉动形式和强度的差异

实验对象是一台有七级轴流式压气机的单轴涡喷发动机。置于压气机第三、四级之间的放气带设计在放气带开关转速 n_{bo} 切换。该发动机的共同工作线在中低转速范围内穿越不稳定工作区域(图1)。因此,放气带的切换有助于兼顾发动机在高转速和中低转速的性能。在压气机机匣上钻了7个孔,以测量各级压气机机匣壁面的静压。

几种不同工况下(过程中),如最大状态、起动过程和减速过程中,机匣壁面的静压数据被采集记录下来。也采集了放气带打开-关闭-打开的动态过程中的静压数据。数据采集使用了10 000 Hz和1 000 Hz的两种数据采集速率。某些工作状态(或工作过程)重复试验了多次,并使用了

不同的数据采集速率。

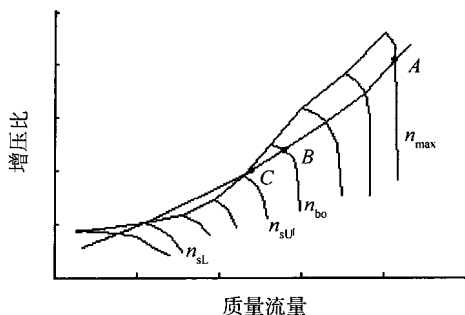


图1 试验发动机压气机特性示意图(未按比例)

Fig. 1 Schematic compressor characteristics of the research engine (not to scale)

最初的想法是检测最先出现在压气机第三、四级的短周期扰动信号。然而,由于明显的短周期扰动信号仅在压气机整机深度失速前几转才出现,很难在压气机失稳前较长时间内检测到这种扰动信号。

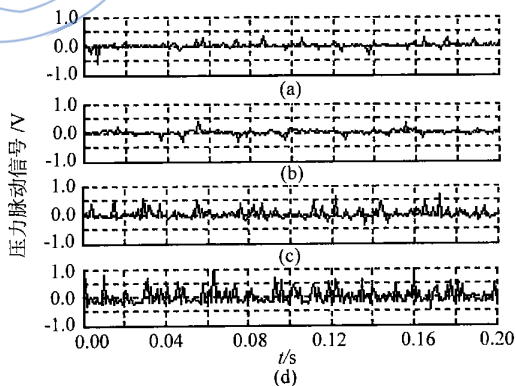


图2 压气机第一级静子机匣壁面静压脉动信号分量的不同形式

(a) 最大状态; (b) 起动过程;

(c) 工作点B(放气带关闭); (d) 工作点C

Fig. 2 Different patterns of casing wall static pressure pulsating components of the first compressor stator correspond to: (a) full speed; (b) starting process; (c) operating point B with opened bleed valve; (d) operating point C

实验中注意到压气机第一级静子机匣壁面静压(p_w)脉动的形式和强度随节流有规律地发生变化,对发动机的节流动作最为敏感(图2)。由于

节流, 发动机的稳定工作裕度不断减小, p_w 的脉动强度增大, 且其脉动形式也相应地发生变化。

实际上, 图 2 中 p_w 的脉动形式和强度的差异是压气机第一级端部流动差异的反映。最大状态时(设计点), 压气机各级流场匹配较好, 流动不发生分离, 因此 p_w 的脉动强度较小。而随着发动机的节流, 工作点沿共同工作线移动, 逐步靠向喘振边界, 压气机的前面级, 尤其是第一级动叶叶尖部位来流攻角增大, 流动会发生分离并渐渐增强。这是 p_w 的脉动强度随工作线接近喘振边界而渐渐增强的原因。

以上关于 p_w 脉动差异的定性解释表明, 有必要发展一种定量的方法来量化 p_w 在不同工作状态下脉动的差异。

2 壁面静压的概率密度函数分析

2.1 壁面静压的概率密度函数分布

数字信号 $p_w[n]$ 是压气机第一级静子机匣壁面静压 p_w 的离散形式, n 是离散时间。用一个宽 N 点的滑动数据窗提取所要处理的数据, 可得 N 点离散时间序列 $p[n], n = 0, 1, \cdots, N - 1$ 。则 $p[n]$ 的脉动分量为:

$$p[n] = p[n] - \bar{p} \tag{1}$$

其中:

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p[n] \tag{2}$$

是 $p[n]$ 的算术平均。

下述的 PDF 分析是对给定离散时间窗内脉动分量 $p[n]$ 的分析。考虑到 $p[n]$ 具有零均值, 其概率密度函数 $f(x)$ 势必满足:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = 0 \tag{3}$$

图 3 显示了 4 种典型工况下压气机第一级静子机匣壁面静压脉动的概率密度函数。图中还用点划线一并绘出了具有相同方差的零均正态分布曲线。图 3(a) 是最大状态(图 1, 工作点 A)时的概率密度函数分布图像。由图可以看出, 在最大状态时, p_w 的脉动分量方差相对较小, 其概率密度函数曲线关于零均值对称。图 3(c) 对应图 1 中的工作点 B (放气带关闭), 此时喘振裕度比最大状态时小得多, 压气机第一级转子叶尖部分来流攻角比设计状态增大较多, 流动分离程度增强。由于第一级转子叶尖部位增强的流动分离, 尾迹涡的脱落、复杂的二次流动和涡系显著影响了紧邻的下游机匣壁面的流动, 因此 p_w 的脉动形式和强度与

设计点相比发生了剧烈变化。图 3(c) 中的概率密度函数曲线表明, 此时 p_w 的脉动分量的方差增大较多, 其概率密度函数分布不再关于零均值对称(峰值左移)。图 3(d) 对应图 1 所示的压气机特性线上最为严重的工作状态(工作点 C)。此时, 发动机的喘振裕度几乎为零, p_w 的脉动代表了发动机所能忍受的最为严峻的工作状态。与图 3(c) 相比, p_w 脉动的方差进一步增大, 其概率密度函数峰值进一步左移, 且亦不关于零均值对称。

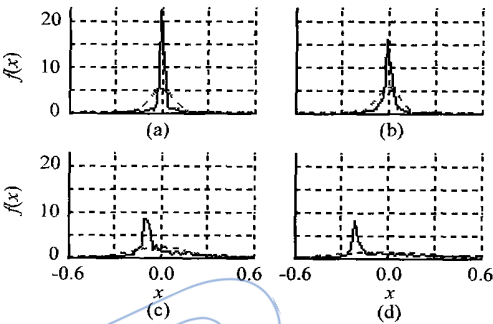


图 3 概率密度函数分布: (a) 最大状态; (b) 工作点 B (放气带打开); (c) 工作点 B (放气带关闭); (d) 工作点 C

Fig 3 PDF distributions correspond to: (a) full speed; (b) operating point B with opened bleed valve; (c) operating point B with closed bleed valve; (d) operating point C

2.2 概率密度函数特征值的定义

归一化的概率密度函数 $f(x)$ 满足:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \tag{4}$$

考虑到 $f(x)$ 是一个非负函数, 因此可以被看作区间 $(-\infty, \infty)$ 上的线性刚体的线密度。则方程 (4) 表明, 这个刚体总质量为 1。这个刚体的质心坐标由下式给出:

$$x_c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx} \tag{5}$$

将方程 (3) 和 (4) 带入 (5) 得出:

$$x_c \equiv 0 \tag{6}$$

因此, 该刚体关于过其质心的纵轴的转动惯量:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx \tag{7}$$

因此, 所考虑的刚体具有常质量 1, 在转轴固定的条件下, 转动惯量 I 唯一由分布密度 $f(x)$ 确

定。由此,图 3 中概率密度函数分布的差异可由转动惯量 I 量化:紧凑对称的概率密度函数分布对应较小的 I 值,而宽的、非对称的概率密度函数分布对应较大的 I 值。

为避免式(7)中的平方运算,定义如下的概率密度函数特征值:

$$\theta = \int_{-\infty}^{\infty} |x| f(x) dx \quad (8)$$

这里,特征值 θ 是式(7)中转动惯量 I 的简化形式,用以量化试验发动机压气机第一级机匣壁面静压脉动在不同工况下概率密度函数的差异。

2.3 机匣壁面静压概率密度函数分析

图 4 绘出了机匣壁面静压脉动信号和对应的概率密度函数特征值 θ 随时间的变化关系。图 4

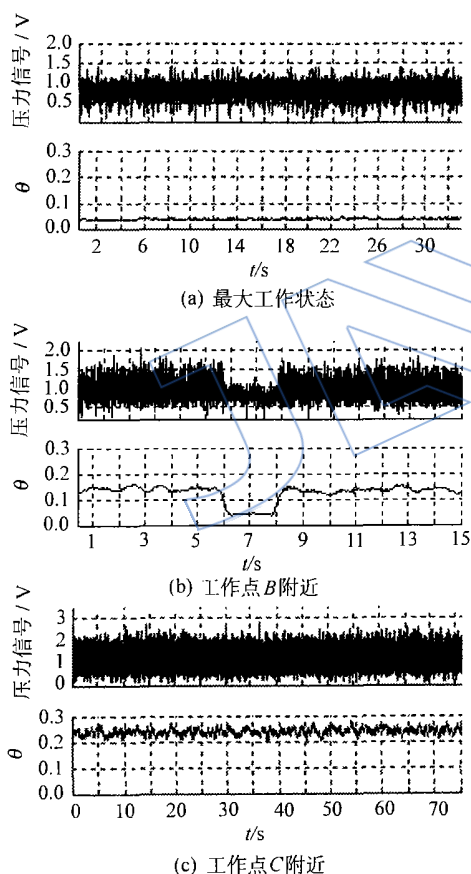


图 4 压力信号和概率密度函数特征值随时间的变化曲线

Fig 4 Time histories of pressure signal and PDF eigenvalue

(a) 对应的是最大状态。由于最大状态时概率密度函数分布紧凑、对称[图 3(a)], θ 相应地较小($\theta \approx 0.04$)。图 4(b) 对应图 1 中的工作点 B, 压力信号 5.8~8.2 s 的一段放气带处于打开状态。与该时

间段外,放气带处于关闭状态相比,在此期间压力脉动幅度减小,且特征值 θ 也较小($\theta = 0.04 \sim 0.05$),与最大状态时接近。这表明此时压气机第一级机匣壁面的流态与最大状态相近。概率密度函数分析也证实了这一点。对照图 3(b) 和图 3(a),在工作点 B、放气带打开的情况下,概率密度函数分布曲线与最大状态时极为相似。而在工作点 B、放气带关闭的情况下[图 3(c)],概率密度函数分布曲线与同一工作转速、放气打开时[图 3(b)]相比,则有明显差异。这说明放气带的开关状态影响了压气机第一级转子叶尖部位的流动,并且概率密度函数分布反映了这种变化。

图 4(b) 中,放气带关闭后(5.8~8.2 s 区间以外),由于流动分离引起的流态变化, θ 值增大较多($\theta = 0.11 \sim 0.15$)。图 4(c) 是从工作点 C (喘振上临界转速 n_{sj} 以上 20 r/min) 慢节流过程中压气机第一级静子机匣壁面静压和特征值 θ 随时间的变化关系。如图,当发动机工作在工作点 C 附近时,其喘振裕度最小,几乎为零,机匣壁面静压脉动的强度增大得较多,其概率密度函数分布变得比工作点 B 在放气带关闭的状态下还要宽,且分布的峰值进一步左移,特征值 θ 也达到了 0.20~0.25 这样的更高的量值,远大于工作点 B 对应的 θ 值。

2.4 稳定性监测阈值的选取

如前文所述,压气机机匣壁面静压脉动信号的概率密度函数特征值 θ 可以反映试验发动机节流过程中压气机第一级端部的流动分离程度。经过多组数据分析,确定特征值 θ 的阈值 θ 宜取在 $[\theta_{min}, \theta_{max}] = [0.14, 0.20]$ 之间。其中,阈值 $\theta = \theta_{min} = 0.14$ 对应放气带开关转速所在的工作点 B,此时压气机第一级端部流动分离已经比较严重。阈值 θ 满足 $\theta_{min} < \theta < \theta_{max}$ 时,压气机第一级端部流动分离程度进一步增大,但尚没有进入深度失速的危险。当 $\theta > \theta_{max}$ 时,压气机第一级端部流动分离的程度已经相当严重,压气机随时有进入整机深度失速的危险。

在 $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ 范围内,较小的阈值 θ 对流动分离具有较高的灵敏度,而较大的阈值 θ 则可以减少放气带开关的次数。若取 $\theta = \theta_{min} = 0.14$,在节流过程中动态监测特征值 θ 的变化,可以在压气机整机失速之前 200 r/min 以上发出失速预警信号,为防喘控制系统提供较长的控制响应时间。

3 讨 论

中低转速下, 试验发动机压气机的前面级, 特别是第一级, 对发动机节流动作最为敏感。当发动机工作点沿工作线逐渐接近喘振边界时, 压气机第一级端部的流动开始分离。由于该发动机压气机第一级轮毂比和级负荷均较小, 进一步的节流会导致该区域的流动分离强度和范围逐渐增大, 而不会立即发生深度失速。机匣壁面静压脉动的形式和强度也会相应地发生变化。

在喘振裕度和压气机第一级端部流态之间存在一定的内在联系。静压脉动分量的概率密度函数分布可以刻画第一级端部流态的某些特征。对于端部流动没有发生分离, 机匣壁面静压脉动的概率密度函数分布紧凑、对称; 对于较为严重的分离流动, 概率密度函数分布较宽, 且对称性被破坏; 对于严重的端部分离流动, 概率密度函数分布进一步展宽, 且其峰值左移更多、分布对于零均值的对称性已无从可言。

有几个细节需要特别的注意。首先, 放气带关闭后, 工作点 B 和工作点 C 的机匣壁面静压脉动信号概率密度函数分布峰值左移[图 3(c) 和图 3(d)], 这表明较低的压力主导压气机第一级静子机匣壁面的流动, 这是不同的近失速工况下, 压气机第一级端部流动分离和伴生的复杂涡系、二次流动及其与机匣壁面边界层相互作用的结果。

其次, 与有较为严重的流动分离相对应, 工作点 B 和工作点 C 特征值 θ 脉动幅度较大[图 4(b) 和图 4(c)]; 与此相反, 没有流动分离的工作点 A , 特征值 θ 脉动幅度则小得多[图 4(a)]。这也从侧面反映了分离流动的严重非正常性。

4 结 论

定义了机匣壁面静压脉动的概率密度函数特征值 θ 来刻画不同工况下试验发动机压气机第一级端部的流动状态: 较小的 θ 值意味着匹配较好的流动, 而较大的 θ 值则表明有较为严重的端部流动分离。

通过概率密度分析监测该发动机压气机中低转速不稳定工作征兆, 而不是直接检测失速前的模态扰动或短周期扰动, 是检测发动机气动不稳

定征兆的新思路, 预期可为该型发动机提供较长的失速预警时间。

参考文献

- [1] Tryfonidis M, Etchevers O, Paduano J D, et al. Pre-stall Behavior of Several High-Speed Compressors[J]. *ASME J. Turbomach.*, 1995, 117(1): 62~80
- [2] Tahara N, Nakajima T, Kurosaki M, et al. Active Stall Control with Practicable Stall Prediction System Using Auto-Correlation Coefficient[R]. *IAA 2001-3623*
- [3] 张朴, 祝雪平, 李应红. 失速起始检测的平均数值差分方法[J]. *航空动力学报*, 2003, 18(4): 546~548
ZHANG Pu, ZHU Xue-ping, LI Ying-hong. An Averaged Numerical Difference Method for Detection of Stall Inception[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(4): 546~548
- [4] Bright M M. Chaotic Time Series Analysis Tools for Identification and Stabilization of Rotating Stall Precursor Events in High Speed Compressors[D]. *Akron: Akron University*, 2000
- [5] Paduano J D, Epstein A H. Compressor Stability and Control: Review and Practical Implications[A]. *RTO MP-051, RTO AVT Symposium on "Active Control Technology for Enhanced Performance Operational Capabilities of Military Aircraft, Land Vehicles and Sea Vehicles"* [C]. *Brunswick, Germany*: 2000
- [6] 于宏军, 刘宝杰, 刘火星, 等. 近失速状态下压气机转子叶尖旋涡流动研究[J]. *航空学报*, 2004, 25(1): 9~15
YU Hong-jun, LIU Bao-jie, LIU Huo-xing, et al. Investigation of Tip Vortex in Compressor at Near Stall Condition[J]. *ACTA Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2004, 25(1): 9~15
- [7] 程邦勤, 陶增元, 李军. 涡扇发动机进气畸变脉动压力分析[J]. *航空动力学报*, 2003, 18(1): 65~69
CHENG Bang-qin, TAO Zeng-yuan, LI Jun. Pulsatile Analysis of Inlet Pressure Distortion in Turbofan Engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(1): 65~69
- [8] Harper D K, Leitch T A, Ng W F, et al. Boundary Layer Control and Wall-Pressure Fluctuations in a Serpentine Inlet[R]. *IAA 2000-3597*
- [9] Hathaway M D, Gertz J B, Epstein A H, et al. Rotor Wake Characteristics of a Transonic Axial-Flow Fan[J]. *IAA Journal*, 1986, 24(11): 1802~1810
- [10] Saijo T, Ganesh B, Huang A, et al. Development of Unsteadiness in a Rotor Wake in Ground Effect[R]. *IAA 2003-3519*